

ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ СПЛАВЫ СИСТЕМЫ Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДАМИ СВЕРХБЫСТРОЙ ЗАКАЛКИ ИЗ РАСПЛАВА

*Ивченко М.В., Коуров Н.И., Пушин В.Г., Уксусников А.Н., Wanderka N.**

Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия,
*Helmholtz Centre Berlin for Materials and Energy, Berlin, Germany,
Pushin@imp.uran.ru

В последние годы исследователи все большее внимание обращают на так называемые высокоэнтропийные сплавы (рис. 1) [1]. При наличии по крайней мере пяти металлических элементов с близкими атомными радиусами эти сплавы состава, близкого к эквиатомному, способны образовать фазы на основе твердых растворов замещения с ОЦК или ГЦК кристаллической структурой и отличаются благоприятным комплексом свойств (таких, как твердость, прочность, жаропрочность и термическая устойчивость метастабильных дисперсионно упрочненных структурных состояний). Величина энтропии в высокоэнтропийных сплавах намного выше, чем в традиционных сплавах, что объясняется зависимостью Больцмана: $\Delta S_{mix} = R \ln(n)$, где R - газовая постоянная, а n - число химических элементов в сплаве. Энтропия смешения для фаз твердого раствора увеличивается с малой величины в традиционных сплавах до большой величины в высокоэнтропийных сплавах.



Рисунок 1. Разделение мира сплавов по энтропии смешения [1]

Высокоэнтропийные шестикомпонентные эквиатомные сплавы состава AlCoCrCuFeNi были изготовлены для исследования методами сверхбыстрой закалки расплава (БЗР) сплэтингованием и спиннингованием в виде плоских тонких фрагментов пластин или лент. Закалка методом выстреливания капли по методу сплэттинга позволяет достичь скорости охлаждения $V_{зак} 10^6$ К/с и выше. Метод заключается в столкновении капли расплава с охлаждающей поверхностью, в данном случае, медной мишенью. В устройстве используется взрывной заряд при среднем размере капель от 1 до 13 мкм и скорости облака из капель 300 м/с, скорость охлаждения на закалочной поверхности составляет $10^6 \dots 5 \times 10^8$ К/с. Этот

метод позволяет получать образцы в виде пластин или чешуек с характерным диаметром не более нескольких сантиметров и толщиной, колеблющейся от 0,1 до нескольких десятков микрон в пределах одного образца. [2]

Метод спиннингования расплава заключается в экструдировании расплава под давлением через сопло на вращающийся холодильник. Разливка струи на поверхность дискового холодильника, вращающегося относительно вертикальной оси, позволяет получать непрерывные металлические нити толщиной 1...100 мкм с линейными скоростями вращения 15...300 м/с. Скорости охлаждения при этом составляют $10^5 \dots 10^6$ К/с. Вакуум или инертная среда способствуют образованию более однородных лент. Исследования структуры сплавов проводили методами просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, измеряли также их физико-механические свойства.

Установлено, что применение БЗР обеспечивает в полученных поликристаллических сплавах образование атомноупорядоченного по типу В2 твердого раствора с однородным распределением всех элементов в пределах зерен. При отпуске ($T=550$ °С, 2 часа) сплавы испытывают распад с выделением наночастиц фазы, насыщенной медью до 40 атомных %. В результате более продолжительного отпуска при той же температуре ($T=550$ °С, 5 часов) образуются наночастицы трех В2 фаз: первой с однородным распределением всех элементов, второй с содержанием меди до 40 атомных % и третьей, обогащенной по химическим элементам Cr, Fe, Co. После отпуска при температуре 600 °С с выдержкой 2 часа в сплаве было обнаружено три фазы выделений с В2 решеткой: фаза, насыщенная медью до 90 атомных %; фаза, обогащенная Fe, Co и Cr; фаза, обогащенная Ni и Al.

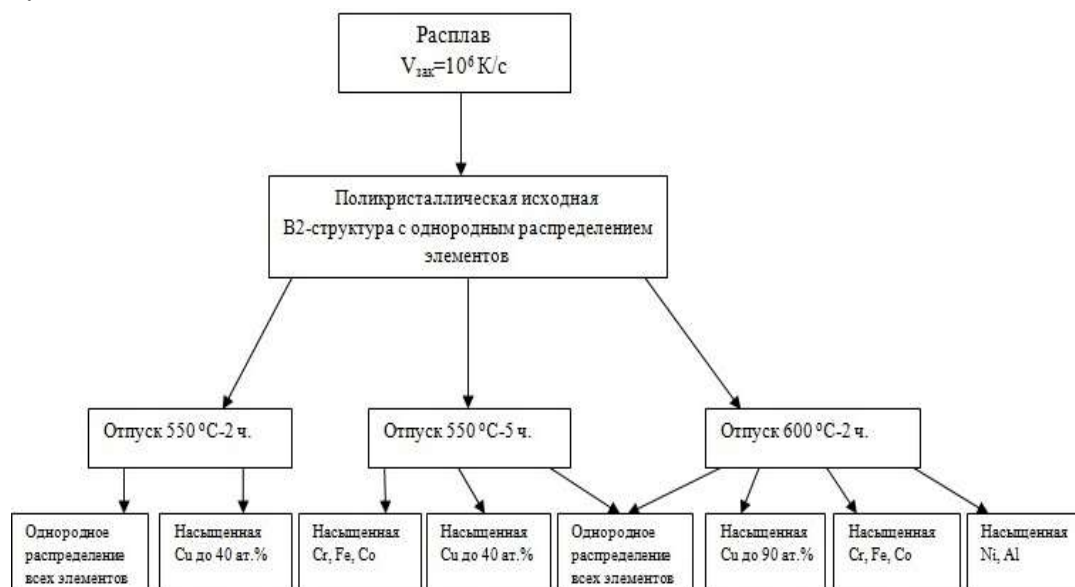


Рисунок 2. Схема разделения фаз в быстрозакаленном сплаве системы Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni

Таким образом, установлено, что исследованный высокоэнтروпийный сплав имеет тенденцию к образованию кубических атомноупорядоченных нанокристаллических фаз (типа B2). Необходимо отметить, что тип кристаллической решетки фаз, в отличие от их химического состава, в процессе отпуска не изменяется. Ранее формирование таких фаз и структурных составляющих в данных сплавах, полученных обычными методами кристаллизации, не наблюдалось. [2]

Обнаружено, что твердость и модуль упругости высокоэнтропийного сплава после отпуска при 550°С возрастают в два раза, в отличие от исходного быстрозакаленного. Кроме того, обнаружено, что сплав обладает низкой ползучестью после отпуска. Данные свойства, очевидно, обусловлены распадом сплава, в результате которого происходит его расслоение на B2 фазы: фазу стехиометрического состава Fe-Co-Cr-Ni-Al, фазу, обогащенную медью, и, напротив, фазу, обогащенную Fe, Co и Cr.

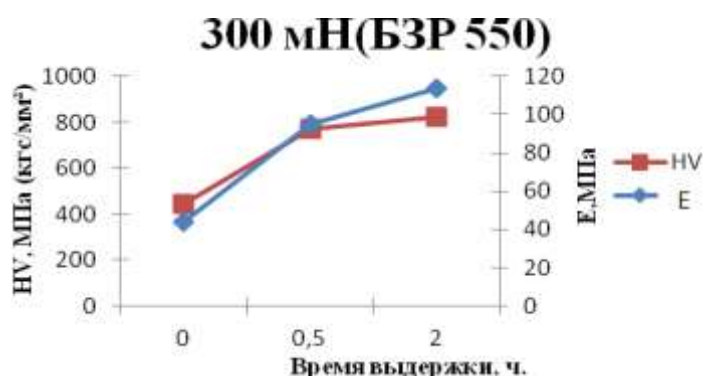


Рисунок 3. График зависимости твердости и модуля упругости от времени выдержки при температуре 550 °С и различных нагрузках в БЗР сплаве

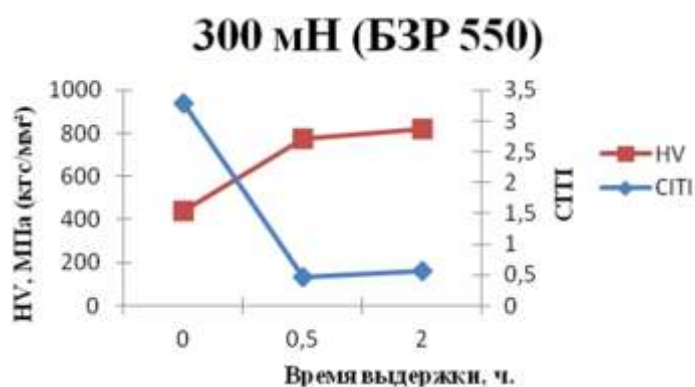


Рисунок 4. График зависимости твердости и ползучести от времени выдержки при температуре 550 °С и различных нагрузках в БЗР сплаве

Список литературы

1. Jien-Wei Yeh High-Entropy Alloys – A New Era of Exploitation / Yu-Liang Chen, Su-Jien Lin // Materials Science Forum. 2007. Vol. 560. P. 1...9.
2. Wanderka N. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy / S.Singh, U. Glatzel, J. Banhart // Acta Materialia. 2011. 59. P. 182...190.